

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1234R567 – Název studijního oboru

## **Konstrukce 3D tiskárny**

## **Construction of 3D printer**

### **Bakalářská práce**

Autor: **Marek Valšík**

Vedoucí práce: doc. Mgr. Ing. Václav Záda, CSc.

V Liberci 1. 2. 2013

Zadání

Zde bude vloženo zadání

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mě podporovali a vycházeli mi vstříc. Jmenovitě pak doc. Mgr. Ing. Václavu Zádovi, CSc., který mi umožnil zvolit konstrukci 3D tiskárny jako téma bakalářské práce. Také organizuje jednání Síťového centra robotiky a setkání členů Klubu robotiky, kde byla tiskárna prezentována a započata spolupráce s ředitelem Merkur toys, s. r. o, Ing. Jaromírem Křížem.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je popsat historii 3D tiskáren, jejich možnosti a využití. Hlavním cílem je postavit jednu tiskárnu na základě konstrukce Josefa Průši. Vylepšit tuto konstrukci, aby bylo možné ji lehce přemístit a zkvalitnit její vlastnosti. Popsat jednotlivé části postavené tiskárny (mechaniku, elektroniku a software). Vysvětlit princip postavené tiskárny. V závěrech pak porovnat s profesionálními 3D tiskárnami a navrhnout případná další vylepšení. Zhodnotit kvalitu tištěných objektů a jejich možnosti využití. Popsat časovou, finanční a konstrukční náročnost.

## **Klíčová slova:**

3D tiskárna, RepRap, Mendel, 3D tisk

## **Abstract**

The aim of this work is to describe the history of 3D printers, their capabilities and applications. The main aim of this work is to construct one printer based on construction designed by Josef Průša. Adjust the structure to allow easy movement and improve its properties. Describe the parts constructed printer (mechanics, electronics, and software). Explain the principle of built printer. In the final part is compared with professional 3D printers and described some suggestions for possible improvements. Assess the quality of printed objects and their possibilities. Describe the time, financial and constructional complexity.

## **Key words:**

3D printer, RepRap, Mendel, 3D print

## Obsah

1	Úvod .....	8
1.1	Vývoj 3D tiskáren ve světě .....	8
1.2	Technologie nanášení materiálu.....	8
1.3	Využití 3D tiskáren v praxi .....	9
2	Tiskárna RepRap Průša Mendel .....	11
2.1	Open source.....	11
2.2	Mechanika tiskárny .....	12
2.3	Elektronika tiskárny .....	17
2.4	Použitý software.....	18
2.5	Princip tisku .....	23
3	Závěr a doporučení .....	26
3.1	Parametry postavené tiskárny .....	26
3.2	Porovnání s profesionální tiskárnou ZPrinter 450 .....	26
3.3	Doporučení pro stavbu další tiskárny.....	29
3.4	Možnosti vylepšení postavené tiskárny .....	29
3.5	Závěr .....	30

## Seznam zkratek, symbolů a termínů

DLP	Digital Light Processing - technologie digitálních projektorů
RepRap	<b>re</b> plicating <b>ra</b> pid <b>p</b> rototyper
STL	<b>S</b> tereo <b>L</b> ithography – souborový formát
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
LCD	liquid-crystal display – displej z tekutých krystalů
SD	Secure Digital – paměťová karta
3D	trojrozměrný
PID	proporcionálně integračně derivační
CNC	číslicově řízený obráběcí stroj
G-kód	je název programovacího jazyka pro CNC stroje
PWM	Pulse Width Modulation – pulsně šířková modulace
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (sériová linka)
PLA	Polylactic acid
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene

# 1 Úvod

## 1.1 Vývoj 3D tiskáren ve světě

První 3D tiskárna byla vynalezena Charlesem Hullem v roce 1984. Jednalo se o Stereo-litografickou 3D tiskárnu, kdy laserový paprsek svítil na fotopolymer. Po osvětlení celé první vrstvy se objekt ponořil zhruba o 0,06 mm a tím se nad již hotovou vrstvu dostal další, ještě neosvětlený fotopolymer a mohla se osvětlit další vrstva.

Další vyvinutý typ 3D tiskárny pracoval na podobném principu. Nevyužívalo se laserového paprsku, ale DLP (digital light processing) projektoru, který osvětlil celou vrstvu najednou.

Fotopolymery nejsou nejlevnější záležitostí a jejich skladování je problematické. Proto v roce 1988 vynalezl Scott Crump první 3D tiskárnu, která tiskla roztavený plast.

Od té doby se 3D tisk velmi zdokonalil. Dnes se používá například laserový paprsek na spékání kovového prášku a lze tedy tisknout i kovové objekty. Nejde přímo o 3D tisk, ale o velmi podobnou technologii.

Další technologickou možností je vyřezávání fólií a jejich vrstvení. Ale od toho se již upouští vzhledem k výhodnějším a přesnějším novým technologiím.

Existuje mnoho možností 3D tisku a další teprve vznikají. Některé jsou kombinací zmíněných, další pracují na zcela jiných principech.

## 1.2 Technologie nanášení materiálu

V dnešní době je 3D tisk velmi rozšířen a jednou z nejjednodušších metod tisku je nanášení materiálu vrstvu po vrstvě. Lze tisknout z mnoha různých materiálů. Například z plastů PLA, ABS nebo i z běžných potravin jako čokoláda nebo sýr.

Většinou se tedy jedná o tisk roztavených materiálů. Principem je, že do trysky se dávkuje studený materiál, zde se nataví a další ještě neroztavený materiál ho vytlačí ven. Tam musí materiál dosednout na tiskovou desku nebo na předešlou vrstvu. V závislosti na materiálu, na velikosti vrstvy a rychlosti tisku lze překonávat určité úhly, kdy většina materiálu dosedá na předchozí vrstvu a jen jeho část visí ve vzduchu. Nebo lze tvořit i takzvané mosty, kdy se materiál natáhne mezi dva pevně uchycené body. Pro překonávání podobných překážek lze použít i tisk z více materiálů, kdy jeden materiál tvoří požadovaný tvar a druhý podpůrné sloupky, které se nakonec odlomí nebo odstraní chemicky.



### 1.3 Využití 3D tiskáren v praxi

Využití 3D tiskáren je velmi široké. Většinou se používají v průmyslu pro rychlou výrobu prototypů. Třeba v automobilovém průmyslu se takto tisknou nárazníky, než se na ně vyrobí finální forma.

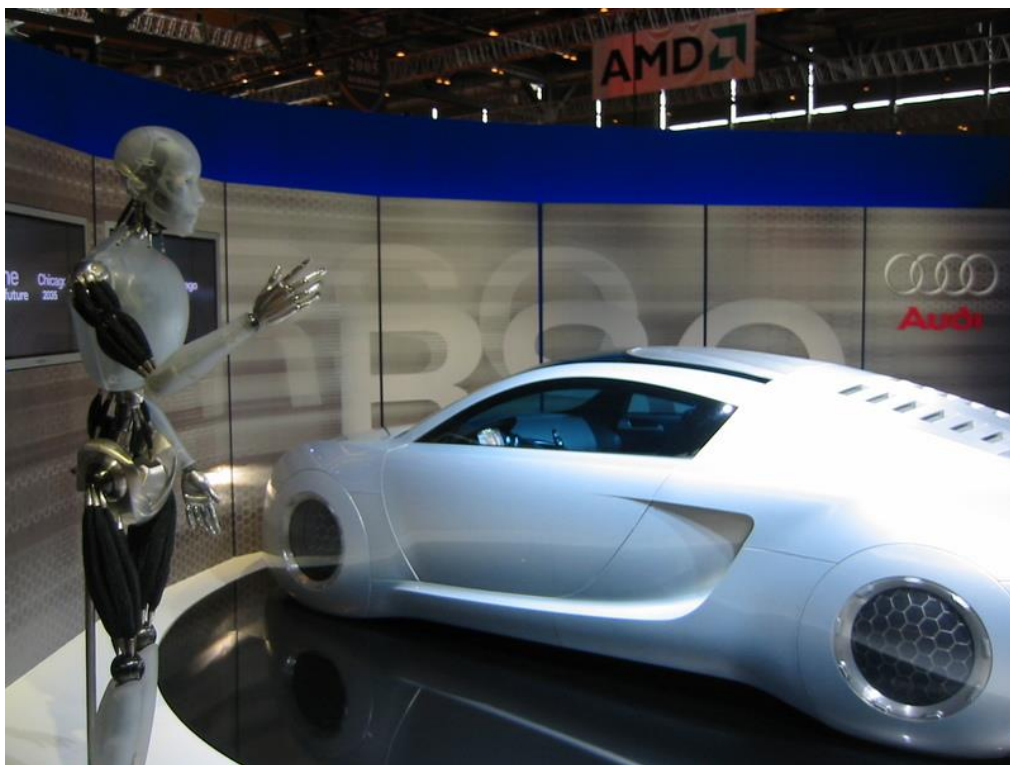
Samozřejmě je lze použít i pro armádní účely. Americká armáda zkouší na bojiště vozit 3D tiskárnu, když se pokazí nějaká součástka, tak si ji jednoduše vytisknou a vymění ji[1]. Na internetu se nachází spousta 3D modelů ručních zbraní, přímo určených pro tisk na tiskárně. Po vytištění se doplní komora, hlaveň a úderník z tvrdších materiálů, většinou z kovu, ale lze použít i speciální keramiku, a v tom případě je pak zbraň nezjistitelná detektorem kovů[2].

Využití v medicíně se teprve rozvíjí. Používají se tištěné protézy, které pomáhají lidem s různými druhy postižení[3]. Pracuje se na možnosti tisku orgánů, které už nemá k realizaci daleko. Začátkem tohoto roku (2013) se již podařilo vytisknout kmenové buňky a neměl by být problém z nich vytvořit orgány[4]. V polovině dubna se objevily informace o prvních uměle vytvořených myších ledvinách, které fungují.

Ve vesmírném programu má 3D tiskárna své místo zaručené. Pracuje se na možnosti tisku integrovaných obvodů nebo rovnou celých obvodových desek přímo ve vesmíru, kde se těžko shání náhradní díly. A nemusí jít jen o složité věci. Stačí, aby se ve vesmíru utrhl nějaké madlo nebo se něco zlomilo, a může to kosmonautům znepříjemnit život.

V modelářství je 3D tiskárna neocenitelným pomocníkem. Stačí model vytvořený na počítači a za pár hodin ho můžete mít i fyzicky na stole. Dokonce není problém nechat vytištěný model odlít z kovu. Jsou i specializované 3D scannery, kterými se nasnímá auto a pak lze vytisknout jeho model. Nebo jeden z dalších open-sourceových projektů využívá pro snímání 3D objektů Kinect. Díky němu lze tisknout i modely lidí.[5]

Je mnoho možností jak 3D tiskárnu využít. Minulý rok, v rámci bakalářského projektu, byl na mobilního robota tištěn uchopovací mechanismus. Ten mně a Zbyškovi Zapadlíkovi pomohl vyhrát soutěž autonomních robotů. Ta se konala 28. 4. 2012 v Praze. Vítězný pohár (Obr. 2) jsme si odnesli z nejobtížnější kategorie. Cílem bylo autonomní projetí dráhy, nalezení plyšového medvěda v herním poli a návrat i s ním na startovací pozici. Není ani problém vytvořit originální dárek. Například lze vytvořit formu z plastu, vylít čokoládou a čokoládová figurka s vytištěným jménem je hotová.



Obr. 1 Audi vytištěno průmyslovými roboty KUKA

NEWTH, Eirik. <http://www.flickr.com> [online]. [cit. 2. 4. 2013]. Dostupný na WWW: <http://www.flickr.com/photos/eiriknewth/6995583/>



Obr. 2 Fotografie z RoboticDay 2012. Zleva: Marek Valšík, Zbyšek Zapadlík a doc. Mgr. Ing. Václav Záda, CSc.

## 2 Tiskárna RepRap Průša Mendel

RepRap (**Re**plicating **R**apid **P**rototyper) projekt byl započat v roce 2005. Na jaře roku 2007 byly vytištěny součástky na první RepRap tiskárnu Darwin na průmyslové tiskárně Stratasys Dimension. Kompletní historii 3D tiskáren lze nalézt na stránkách [http://reprap.org/wiki/RepRap\\_Family\\_Tree](http://reprap.org/wiki/RepRap_Family_Tree), nebo na přiloženém DVD.

Tiskárna, postavena v rámci této bakalářské práce, je založena na konstrukci Josefa Průši[7]. Ten je jedním z hlavních vývojářů RepRap tiskáren. Původní tiskárnu Mendel velmi zjednodušil, snížil počet potřebných dílů a zpevnil celou konstrukci. Navrhl i vytápěnou desku MK1, která se používá pro lepší přilnavost tištěného materiálu. Pro konstrukci postavené tiskárny byly použity vytištěné 3D modely součástek, které jsou uvedeny v Tab. 2. Konstrukce Josefa Průši byla rozšířena tak, aby napájecí zdroj a cívka plastu byly součástí konstrukce, ale těžiště tiskárny bylo co nejnižší, aby se zamezilo vibracím a zhoršení kvality tisku. Vzhledem k tomuto rozšíření bylo třeba použít více součástek pro zpevnění konstrukce.

Veškeré součástky a software použité pro stavbu 3D tiskárny jsou pod licencí GNU GPLv2 a novější. To znamená, že jsou volně dostupné pro komerční i nekomerční využití a jejich použití, úprava a následné publikování musí být pod stejnou licencí.

### 2.1 Open source

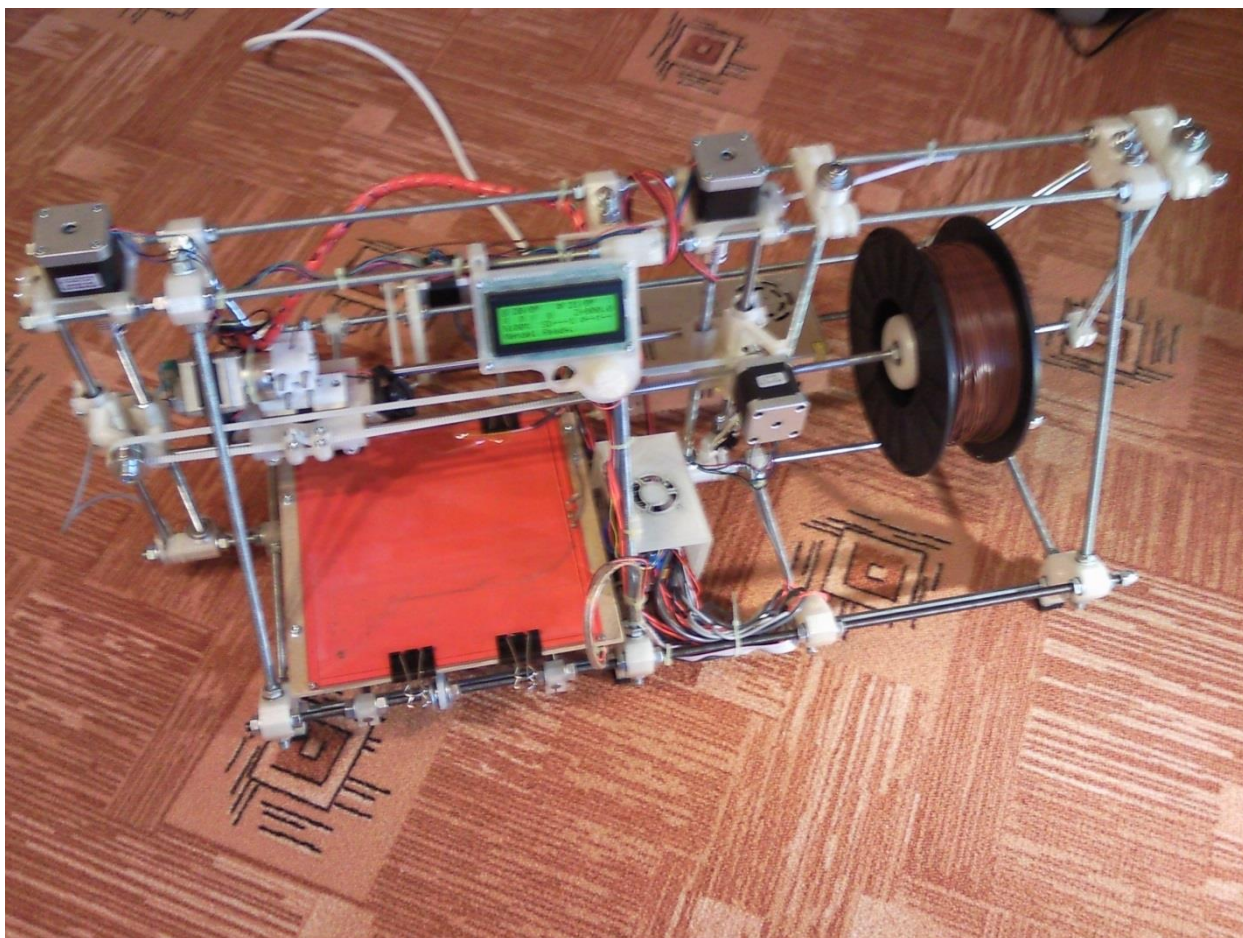
Open source znamená, že zdrojové kódy, výrobní podklady, dokumentace atd. jsou volně šiřitelné a odborná veřejnost může přidávat vlastní nápady, vylepšovat je nebo upravovat pro vlastní potřebu. Díky tomu není nutné platit žádné licenční poplatky za software nebo užití nápadů někoho jiného.

Celý projekt RepRap je open-sourceový. Díky tomu došlo k velkému rozšíření mezi odbornou veřejností a rychlému rozvoji. První RepRap tiskárna byla postavená v roce 2007 a od té doby se v mnoha ohledech vylepšila a zjednodušila. Nejenom konstrukce, ale i software je velmi rychle vylepšován. Například generování příkazů pro tiskárnu z 3D modelu bylo mnohonásobně zrychleno. V programu *skeinforge*, který se vyvíjel zároveň s první konstrukcí RepRap tiskárny, trvalo generování kódu v řádu desítek minut, někdy i hodin. V aktuálně používaném programu *Slic3r* trvá generování v řádu sekund, případně minut.



## 2.2 Mechanika tiskárny

Hlavní konstrukce tiskárny je tvořena závitovými tyčemi, které jsou spojeny tištěnými součástkami a maticemi.



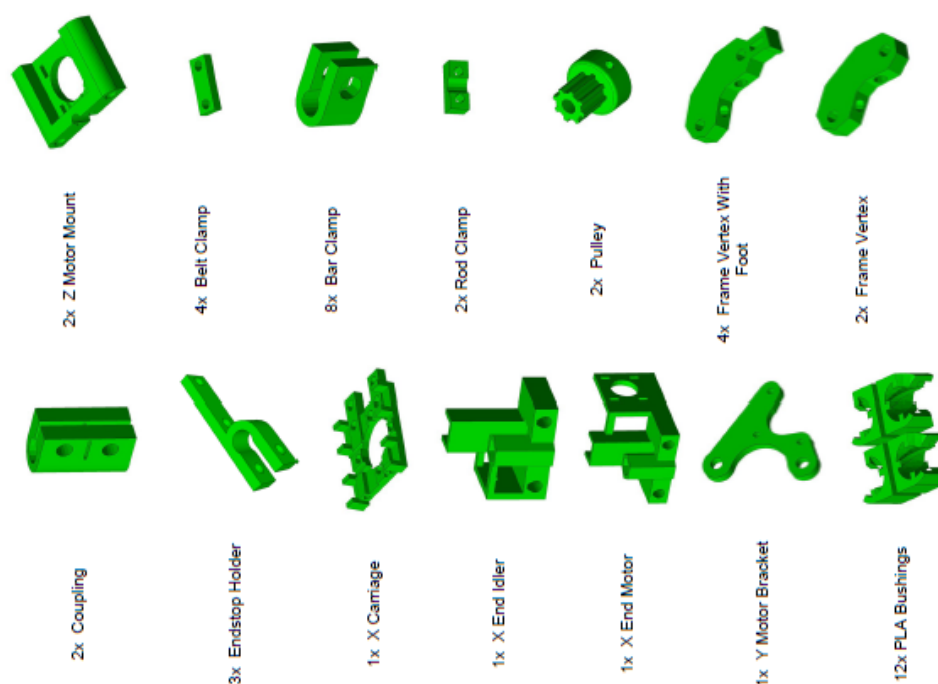
Obr. 3 Fotografie konstrukce tiskárny

Na internetu se nalézá detailní návod pro stavbu základní konstrukce 3D tiskárny *Průša Mendel*. Lze ji najít pod heslem „*Prusa Mendel Visual Instructions*“. Na Obr. 4 je seznam součástí pro první tiskárnu *Průša Mendel* a na Obr. 5 je ukázka z návodu na stavbu.

Na Obr. 6 je zobrazeno několik součástek z 3D tiskárny. Tyto modely byly tištěny zároveň, z důvodů úspory času a elektrické energie. Největší spotřebu má vyhřívaná deska, která se musí zahřát celá i při tisku malé součástky.

# Bill Of Materials

## Printed Parts



Obr. 4 Ukázka z *Prusa Mendel Visual Instructions* – seznam materiálů

# Bill Of Materials

## Non-Printed Parts

Quantity	Description	Type	Comments
83	M8 nut	Fastener	Buy a 100-pack to be on the safe side.
93	M8 washer	Fastener	Buy a 100-pack to be on the safe side.
6	M8x30 mudguard / fender washers	Fastener	
2	M4x20 bolt	Fastener	
2	M4 nut	Fastener	
2	M4 washer	Fastener	
22	M3x10 bolt	Fastener	
16	M3x25 bolt	Fastener	Or eight M3x25 bolt plus eight M3x20 bolts, see §8 steps 5 and 13 for details.
4	M3x40 bolt	Fastener	
70	M3 washer	Fastener	
40	M3 nut	Fastener	
2	M3 grub screw / set screw	Fastener	Eight optionally locknut / stop nut / nyloc
3	608 roller skate / inline skate / skateboard bearing	Bearings	
4	ballpoint pen springs	Spring	
6	M8x370mm	Threaded rod	Three per side
4	M8x294mm	Threaded rod	Front / rear
3	M8x440mm	Threaded rod	Top / bottom
2	M8x210mm	Threaded rod	Z-leadscrew
1	M8x50mm	Threaded rod	Or bolt for X idler
2	8mmx420mm	Smooth rod	
2	8mmx405mm	Smooth rod	Y-bar
2	8mmx350mm	Smooth rod	Z-bar
1	225mmx225mm print top plate	Thick Sheet	
1	140mmx225mm print bottom plate	Thick Sheet	
1	840mmx5mm TS pitch timing belt	Belt	
1	1380mmx5mm TS pitch timing belt	Belt	
5	NEEMA 17 bipolar stepper motor	Stepper	
50	small cable binder / zip tie	Misc	
1	Wade's Geared Extruder		Or any other compatible extruder
1	Electronics + endstops		This can be RAMPS, Gen6, Gen3, or anything else compatible
3	30mmx10mm Optoflags	Thin Sheet	If using opto endstops
2	8mm ID spring	Spring	If using opto endstops

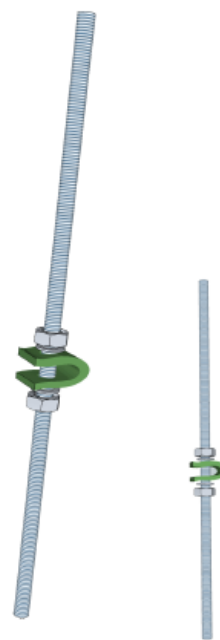
3

Slide another washer onto the rod from the other side.



4

Thread two M8 nuts onto either side of the clamp, until they are next to the washer, but do not tighten them yet.



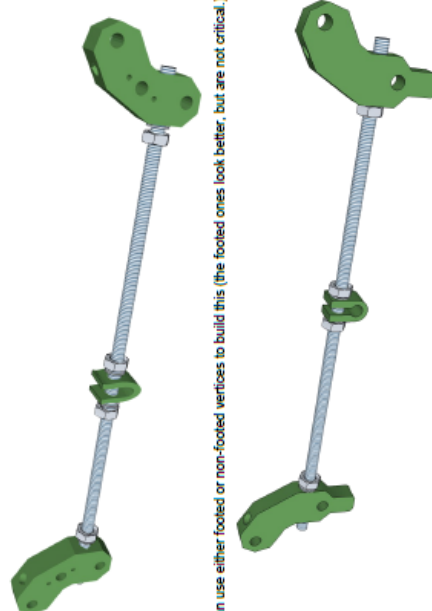
5

Thread another two nuts on each side of the rod, followed by washers. See the picture for what it should look like.



6

Slide the rod through the long bottom (footed) side of two vertices. Make sure the feet point in the same direction. Also make sure the bulge on the non-footed side of the vertex points outwards.



You can use either footed or non-footed vertices to build this (the footed ones look better, but are not critical.)

[ These instructions were started with an earlier Mendel model, therefore all vertices are shown without feet. ]

Obr. 5 Ukázka z *Prusa Mendel Visual Instructions* – stavba základního rámu

Tento návod byl vylepšen návrhy firmy *MakerGear*. Lze je nalézt pod heslem „*MakerGear Mendel Prusa - Differences From Stock Prusa*“ a obsahují velké množství fotografií a popisků.

Tyto dva zdroje byly použity pro stavbu první tiskárny, ze které vychází v této práci diskutovaná tiskárna. V tabulce Tab. 1 a Tab. 2 jsou seznamy součástek potřebných ke stavbě 3D tiskárny stejné, jako je na Obr. 3.

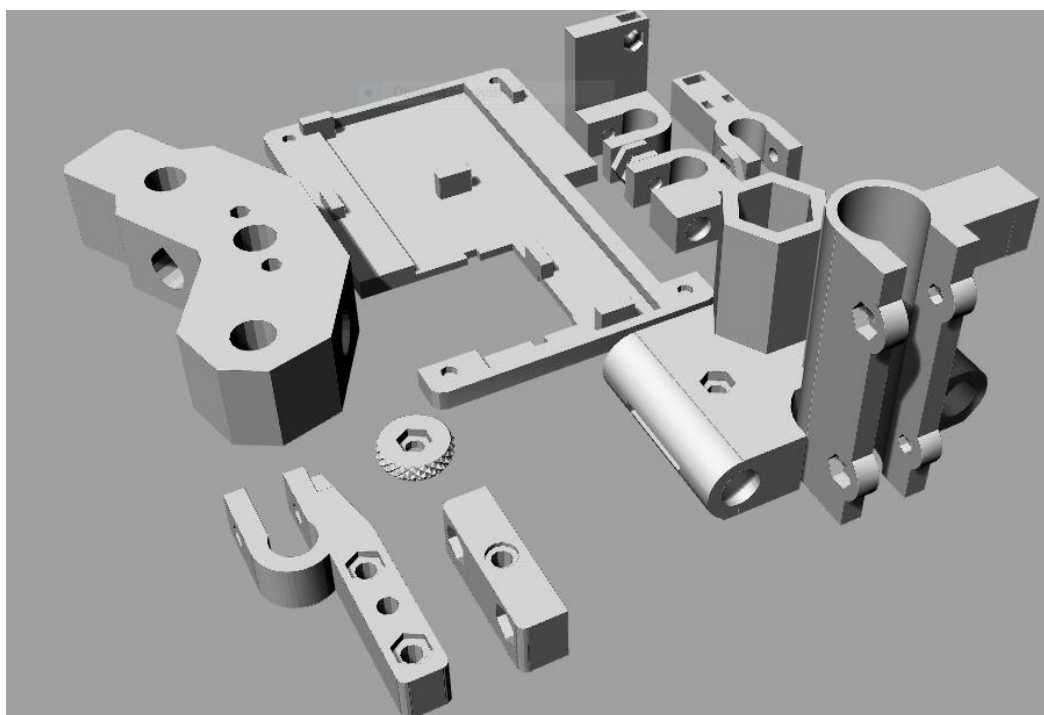
Tab. 1 Seznam mechanických součástek:

Díl	Počet kusů
Závitová tyč M8 x 700 mm	4
Závitová tyč M8 x 800 mm	3
Závitová tyč M8 x 385 mm	9
Závitová tyč M8 x 210 mm	1
Závitová tyč M8 x 290 mm	2
Broušená kalená vodící tyč 8 x 470 mm	2
Broušená kalená vodící tyč 8 x 410 mm	2
Broušená kalená vodící tyč 8 x 350 mm	2
Spojovací materiál (matice, podložky, šrouby)	
Ložisko 608ZZ	8
Ložisko LM8UU	12
Skleněná deska 200 x 215 x 3 mm	1
Plechové svorky	4
Dřevěná deska (MDF) 240 x 215 x 5	1
Ozubený řemen T2,5 950 mm + hnací kolečko	2
MakerGear Stepper Plastruder (tryska, topné těleso, motor)	1
Elektronika (Arduino, zdroj, kabely, snímače)	1

Ačkoliv z původního návrhu tiskárny nebyla v této použita ani jedna součástka, lze díky podobnosti postupovat podle návodu, který je zmíněn výše. U každého modelu z tabulky Tab. 2 je i fotografie, kde je daný díl umístěn, a proto sestavení podobné tiskárny není složité.

Tab. 2 Seznam tištěných dílů

Odkaz	Popis	Počet
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:18384">http://www.thingiverse.com/thing:18384</a>	Zakončení osy ,x' a posun v ,y'	1
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:12979">http://www.thingiverse.com/thing:12979</a>	Pojezd osy ,y'	1
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:4306">http://www.thingiverse.com/thing:4306</a>	Spojovací díly hlavního rámu	10
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:23192">http://www.thingiverse.com/thing:23192</a>	Ukotvení osy ,z'	2
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:13482">http://www.thingiverse.com/thing:13482</a>	Držák na čidla koncových poloh	2
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:21350">http://www.thingiverse.com/thing:21350</a>	Uchycení tyčí k hlavnímu rámu	10
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:17912">http://www.thingiverse.com/thing:17912</a>	Držák elektroniky	1
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:31897">http://www.thingiverse.com/thing:31897</a>	Kryt elektroniky	1
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:16060">http://www.thingiverse.com/thing:16060</a>	Uchycení odvíjení plastu	2
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:21135">http://www.thingiverse.com/thing:21135</a>	Ovládací panel	1
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:29999">http://www.thingiverse.com/thing:29999</a>	Držák pro ventilátor	2
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:18657">http://www.thingiverse.com/thing:18657</a>	Pojezd osy ,x'	1
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:7475">http://www.thingiverse.com/thing:7475</a>	Univerzální držák cívky	2
<a href="http://www.thingiverse.com/thing:21228">http://www.thingiverse.com/thing:21228</a>	Uchycení motoru pro osu ,y'	1



Obr. 6 Ukázka modelů součástek pro stavbu tiskárny



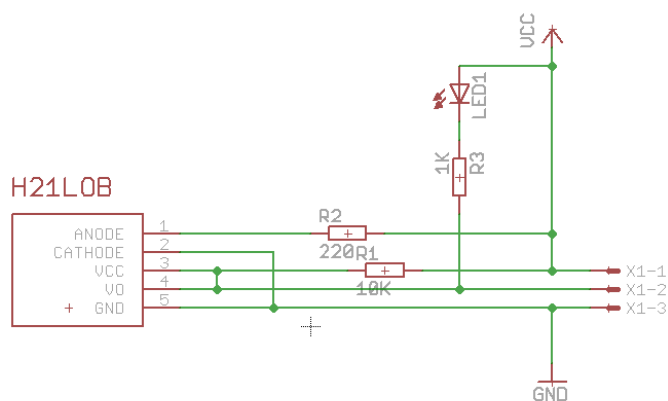
## 2.3 Elektronika tiskárny

Řídící elektroniku tvoří *Arduino Mega 2560*. Tato deska obsahuje mikrokontrolér *ATmega 2560*. Má 54 digitálních vstupů/výstupů, z toho 14 lze použít jako PWM výstupy. Dále má 16 analogových vstupů a 4 hardwarové UARTy (sériové porty). Na desce se nalézá USB konektor, přes který se nahrává firmware do ATmegy a posílají se data tiskárně.

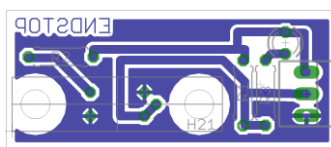
RAMPS 1.4 (*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*) je deska, která se nasadí na desku *Arduino Mega*. Obsahuje 5 slotů pro *Pololu* ovladače krokových motorů, čímž umožňuje připojit řízení tří os a dvou extrudérů. Dále má 3 výkonové PWM výstupy, pro řízení vyhřívané desky a dvou topných těles extrudéru, nebo jednoho topného tělesa extrudéru a ventilátoru, jako v tomto případě.

*Pololu* ovladače krokových motorů mohou dodat do jedné cívky krokového motoru proud o velikosti až jedné ampéry. V tom případě musí být patřičně chlazeny. Proto jsou opatřeny chladiči a nad nimi je 40mm ventilátor. V předchozích verzích bylo použito pouze pasivního chlazení, ale z důvodů požadavku na vyšší přesnost, rychlost a s tím související zrychlení bylo použito chlazení pomocí ventilátoru. Ovladače mají teplotní ochranu a při přehřátí se automaticky vypnou. To způsobí ztrátu informace o aktuální poloze a tiskárna tiskne jinam, než by měla. Díky mikrokrokování, které lze nastavit od jedné poloviny do jedné šestnáctiny, lze dosáhnout vyšší přesnosti i u krokových motorů, které mají malý počet kroků na otáčku.

Vzhledem k potřebě znalosti přesné nulové pozice v ose „z“ byl místo mechanických spínačů použit optický. Jedná se o jednoduchou optickou bránu. Návrh desky se nachází na stránkách [reprap.org/wiki/OptoEndstop\\_2.1](http://reprap.org/wiki/OptoEndstop_2.1) a je používán jak v amatérských návrzích, tak v komerčně vyráběných čidlech pro tyto tiskárny. Tento návrh byl upraven z důvodu domácí výroby na jednostranný plošný spoj. Na obrázcích je schéma i návrh desky (Obr. 7, Obr. 8).



Obr. 7 Schéma optické brány – snímače koncové polohy



Obr. 8 Návrh desky optické brány – snímače koncové polohy

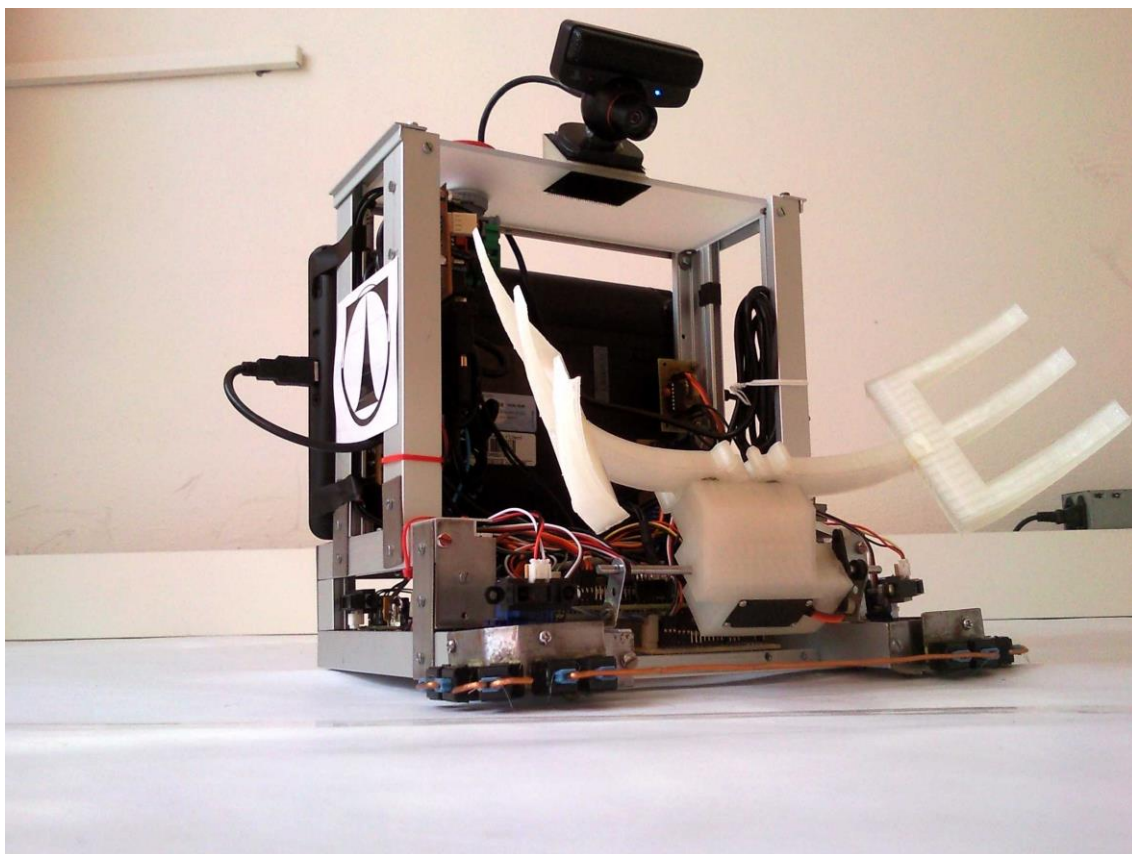
O napájení se stará průmyslový spínaný zdroj s výstupním napětím 12 V a maximálním proudem 30 A. Tento zdroj je dostatečně předimenzován na připojení dalšího extrudéru i osvětlení tiskárny.

## 2.4 Použitý software

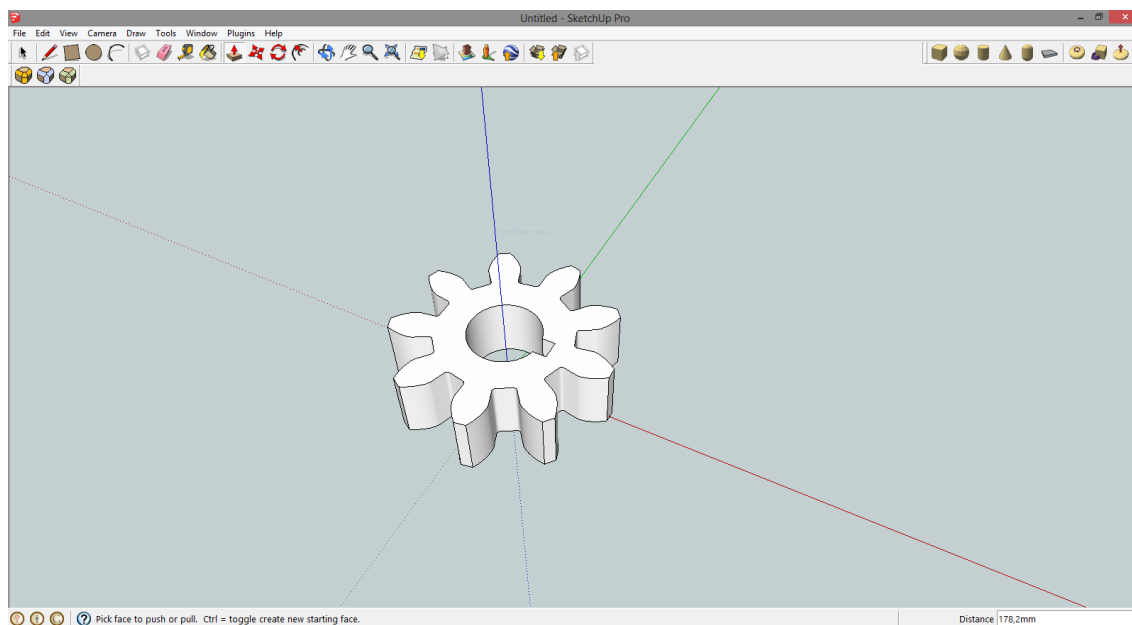
Pro tisk na postavené tiskárně je potřeba mít k dispozici 3D model tištěného předmětu. Ten je možné nakreslit v libovolném programu, ze kterého lze exportovat model do formátu STL. Případně lze stáhnout již hotové modely na stránkách [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com), kam může kdokoli nahrát svoje hotové modely. Tyto stránky obsahují velké množství modelů, jak hraček (Obr. 9), tak užitečných součástek na stavbu 3D tiskáren nebo jiných strojů (Obr. 10). Obsahují i umělecké předměty nebo funkční rozšíření do kreslicích programů na generování ozubených kol nebo jiných složitějších součástí, které by bylo třeba složitě počítat a kreslit. Na Obr. 11 je uveden příklad z programu Google SktechUp. Nakreslení ozubeného kolečka je velmi jednoduché díky rozšíření, které lze do programu stáhnout. Stačí zadat průměr kolečka, počet zubů a typ hřídele. Tím dostaneme kresbu ozubeného kolečka, které lze myší roztáhnout do výšky.



Obr. 9 Fotografie vytištěného pavouka



Obr. 10 Fotografie robotu s vytištěným uchopovacím mechanismem



Obr. 11 Návrh ozubeného kolečka v programu Google SketchUp

Pokud máme k dispozici 3D model, je potřeba vygenerovat příkazy pro 3D tiskárnu. K tomu je aktuálně používán program Slic3r, který je vyvíjen hlavně Alessandrem Ranelluccim za pomoci mnoha dalších lidí z celého světa. Tento program rozřeže model na jednotlivé vrstvy a pro každou vygeneruje příkazy pro pohyb trysky a dávkování materiálu (G-kódy). V tomto programu je nutné nastavit mnoho parametrů. Závisí na tom kvalita tištěného objektu.

Tento software je velmi univerzální a funguje s velkým množstvím 3D tiskáren. Záleží však na použité elektronice a firmwaru. Pokud by si někdo vytvořil vlastní firmware bez kompatibility s jiným, tak by mu tento software nepomohl. V dnešní době však dokáže spolupracovat s většinou komerčně vyráběných poloprofesionálních tiskáren a se všemi tiskárnami z projektu RepRap.

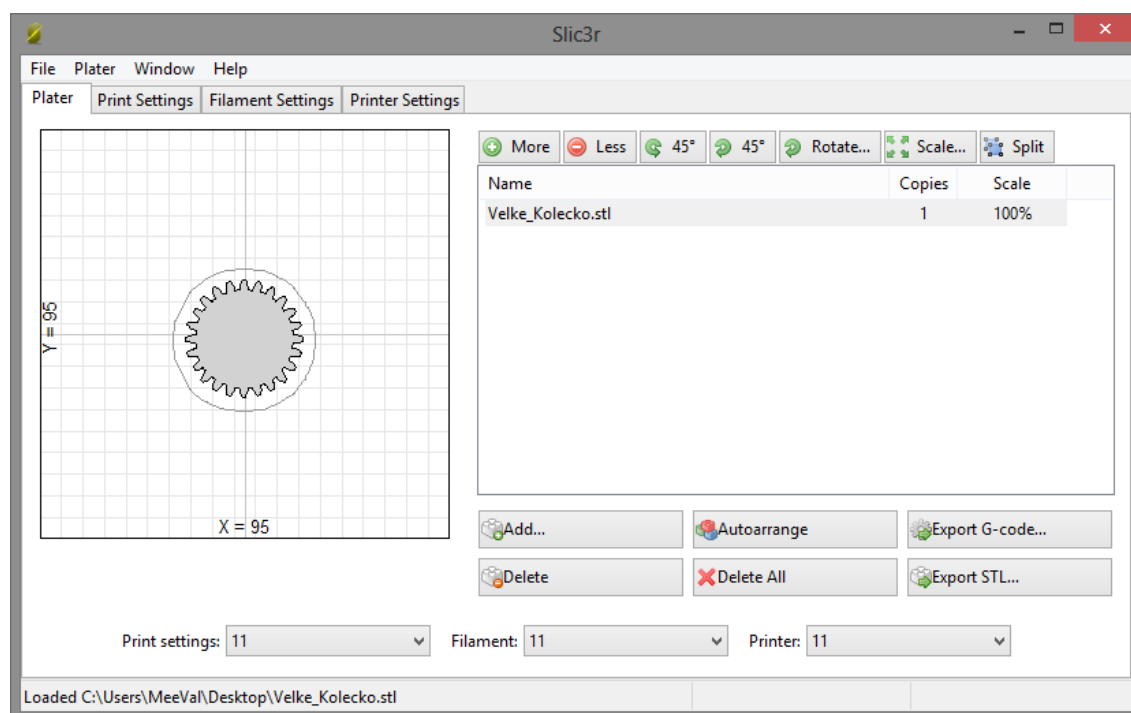
Software má jak grafické, tak konzolové rozhraní. Díky tomu lze lehce udělat vlastní nadstavbu k tomuto programu nebo vytvořit jednoduché scripty.

Nespornou výhodou tohoto programu je podpora více extrudérů. Ať už kvůli tisku z více barev nebo tisku z různých materiálů. Jednoduchým nastavením programu lze zvolit, jaký extrudér bude tisknout hlavní objekt a který třeba jen podpůrný materiál.

Samozřejmostí tohoto softwaru je, že lze na pracovní plochu naskládat více objektů a vygenerovat pro ně jeden G-kód. Tiskárna pak vytiskne všechny součástky najednou.

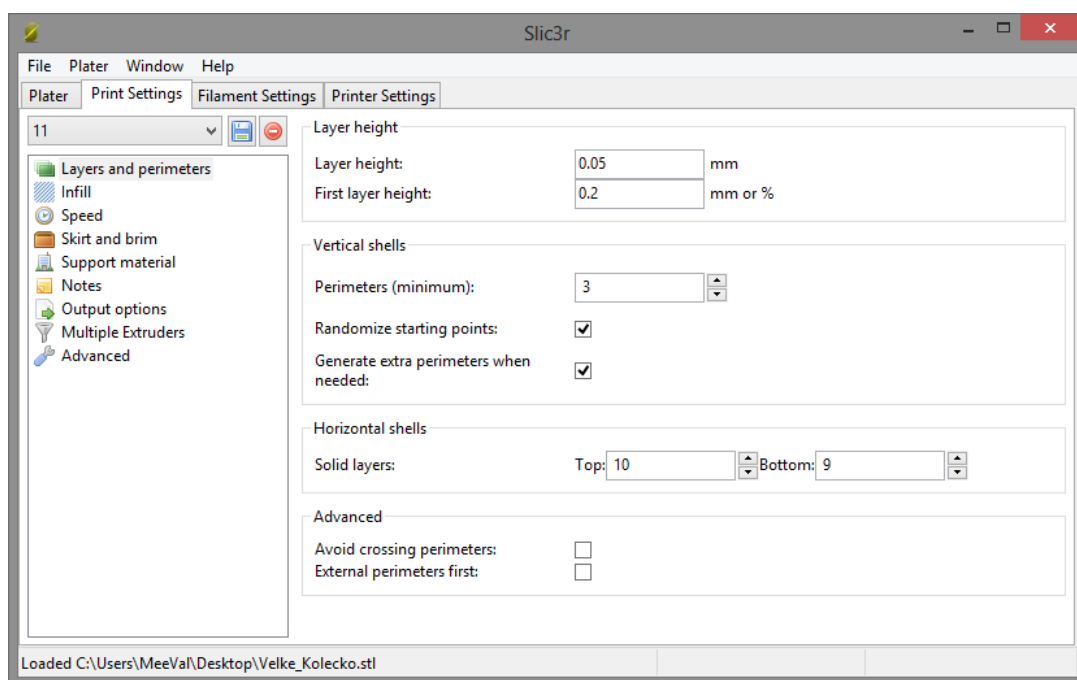
Postupný vývoj tohoto programu přinesl spoustu vylepšení. Dnes již není problém tisknout okraje objektu třeba s výškou vrstvy 20 mikrometrů a vnitřek objektu vyplňovat s výškou vrstvy desetina milimetru. Ušetří se tím čas, ale kvalita objektu bude zachována. Samozřejmě uživatel nevidí, co vše software počítá a umí. Za zmínku stojí třeba výpočty chlazení objektu. Pro dobré výsledky je u malých objektů potřeba snížit rychlost tisku a zvýšit výkon ventilátorů. Proto musí program počítat, jak dlouho se bude tisknout jedna vrstva, a podle potřeby začít tisknout další vrstvu jinde, nebo počkat na ochlazení objektu.

Vstupní soubory pro zpracování tímto softwarem musí být ve formátu STL, AMF, nebo OBJ. Postupem času pravděpodobně přibudou další, ale vzhledem k dobré detekci oblouků složených z úseček a jejich následné rekonstrukci to bude asi zbytečné.



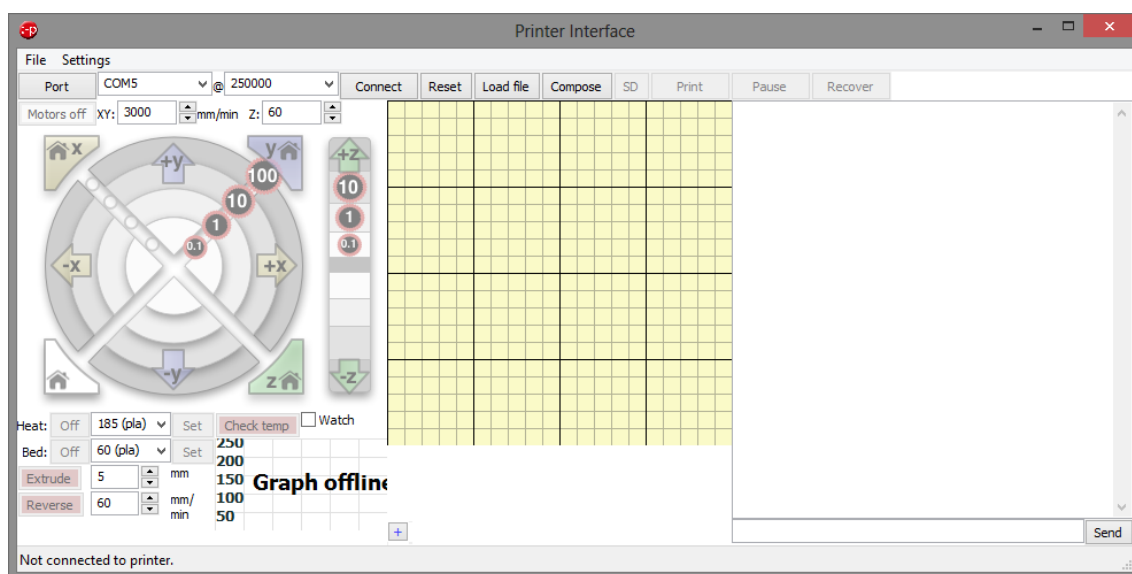
Obr. 12 Program *Slic3r*, úvodní obrazovka





Obr. 13 Program *Slic3r*, jedno z mnoha nastavení

Vygenerovaný soubor s příkazy je potřeba předat tiskárně, aby bylo možné spustit tisk. Pokud je součástí elektroniky pro tiskárnu i čtečka paměťových karet, je možné soubor nahrát na kartu a tisknout přímo z paměťové karty. Pomocí programu *Pronterface* je možné soubor s příkazy poslat do tiskárny přes USB kabel a uložit na paměťovou kartu, pokud ji tiskárna obsahuje, nebo postupně posílat příkazy, které tiskárna bude průběžně plnit. Z tohoto programu je možné tiskárnu i manuálně obsluhovat. To se hodí při odladování, kdy je potřeba hýbat s jednotlivými osami, nechat vytisknout určitou délku plastu, nebo nastavit určitou teplotu.



Obr. 14 Program *Pronterface*

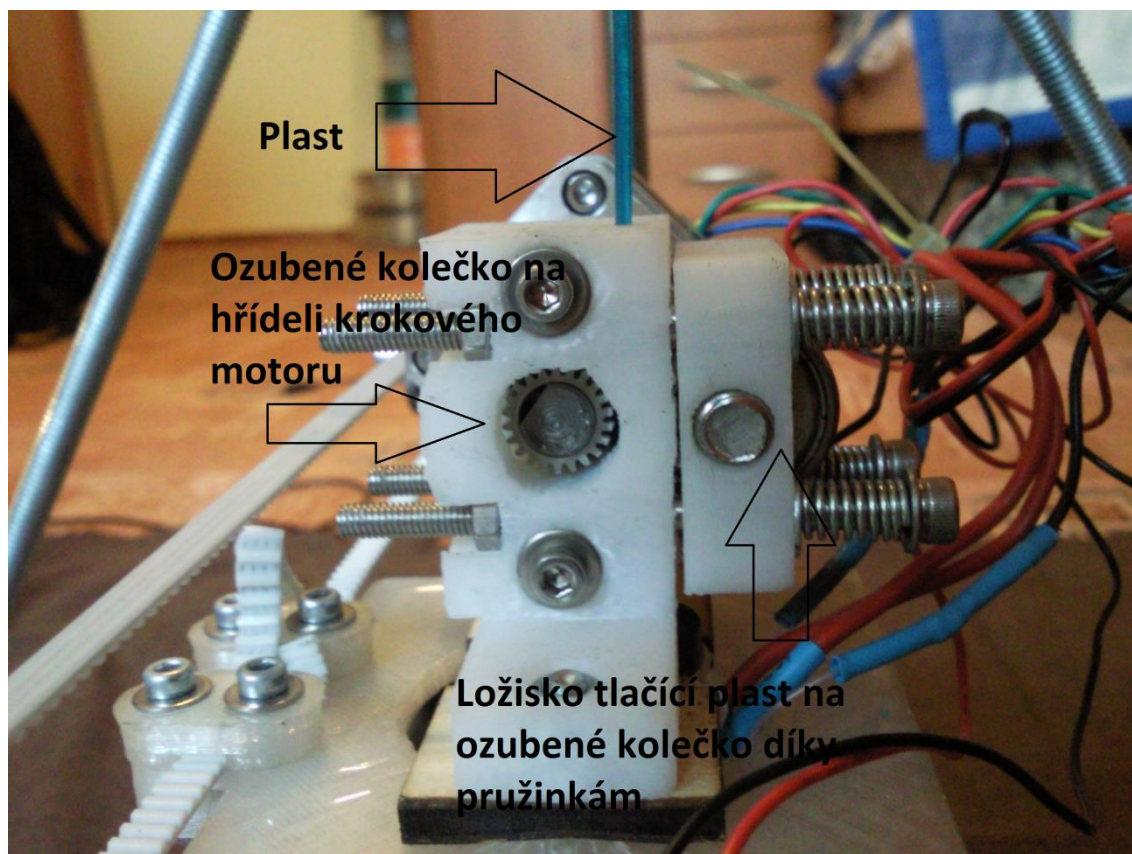
Firmware pro *Arduino Mega 2560* vytvořili Erik van der Zalm a Bernhard Kubicek z předešlých pokusů ostatních lidí. Nalézá se na adrese <https://github.com/ErikZalm/Marlin>, aktuální verze je 1.0.0 RC2. Tato verze byla použita a upravena pro potřeby postavené tiskárny. Možnosti tohoto firmwaru jsou rozsáhlé. Lze jej snadno upravit na různé druhy elektronických desek, připojit LCD panel nebo obsluhovat SD kartu. Je velmi nutné zkompileovat firmware se správnými parametry, jako jsou například počty kroků krokových motorů pro posun o jednotku délky, logika čidel koncových poloh nebo nastavení PID regulátoru pro dosažení a udržování teploty trysky.

Velkou výhodou tohoto firmwaru je analýza následujících instrukcí, které čekají v pořadí na vykonání. Díky tomu lze inteligentně řídit rychlost a zrychlení jednotlivých os, s velkou úsporou času a bez ztráty kvality tisku.

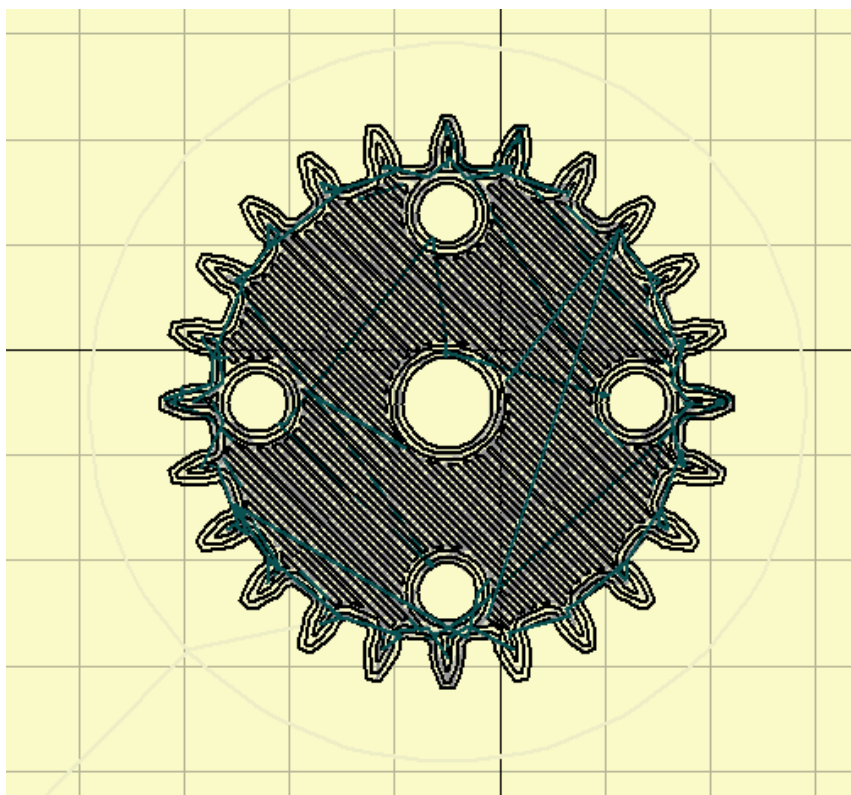
Možnost ukládat jednotlivé parametry tiskárny do paměti EEPROM umožňuje rychlejší odladění tiskárny. Díky tomu není potřeba kompilovat celý firmware jen kvůli změně jednoho parametru. Pokud chceme omezit například maximální zrychlení, lze to udělat přes ovládací panel na tiskárně. Jestliže tuto změnu neuložíme do paměti, tak se při dalším restartu nahraje původní hodnota. Toho lze využít, pokud chceme dočasně omezit maximální rychlost tisku nebo zrychlení.

## **2.5 Princip tisku**

Tiskárna pracuje podobně jako plotr. Snaží se nakreslit jednu vrstvu jednou spojitou čarou a po dokončení této vrstvy na ni kreslí další. Nepoužívá se však barev, ale plastu. Pro tyto tiskárny je to nejčastěji PLA nebo ABS. Plast je ve formě drátu navinutý na cívce. Odtud se dávkuje krokovým motorem. Ten má na hřídeli ozubené kolečko, které se zakusuje do plastu díky ložisku. To je přitlačováno směrem ke kolečku pružinkami a tím se plast tlačí na zmíněné kolečko (Obr. 15). Plast je krokovým motorem přesně dávkován do trysky, kde se nahřeje na potřebnou teplotu a dalším plastem je vytlačován ven. Tam je vytlačován na skleněnou vyhřívanou desku nebo na předešlou vrstvu. Prvních pár vrstev je vyplňováno plastem úplně, jak je vidět na Obr. 16. Další vrstvy mohou být duté, kvůli úspoře materiálu. To je vidět na Obr. 17, kde je nastaveno vyplňování objektu pouze z 20 %.

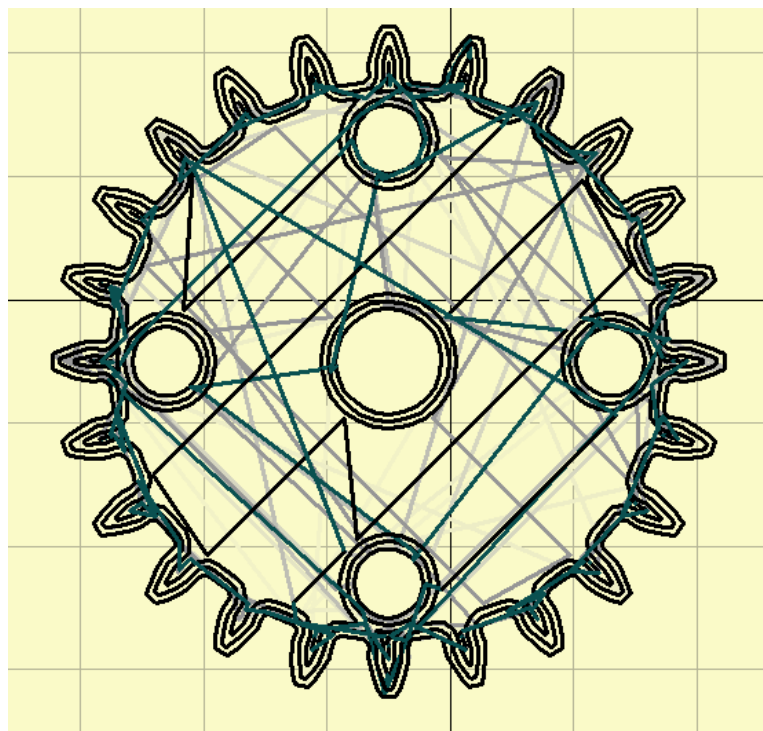


Obr. 15 Fotografie mechanismu na dávkování plastu

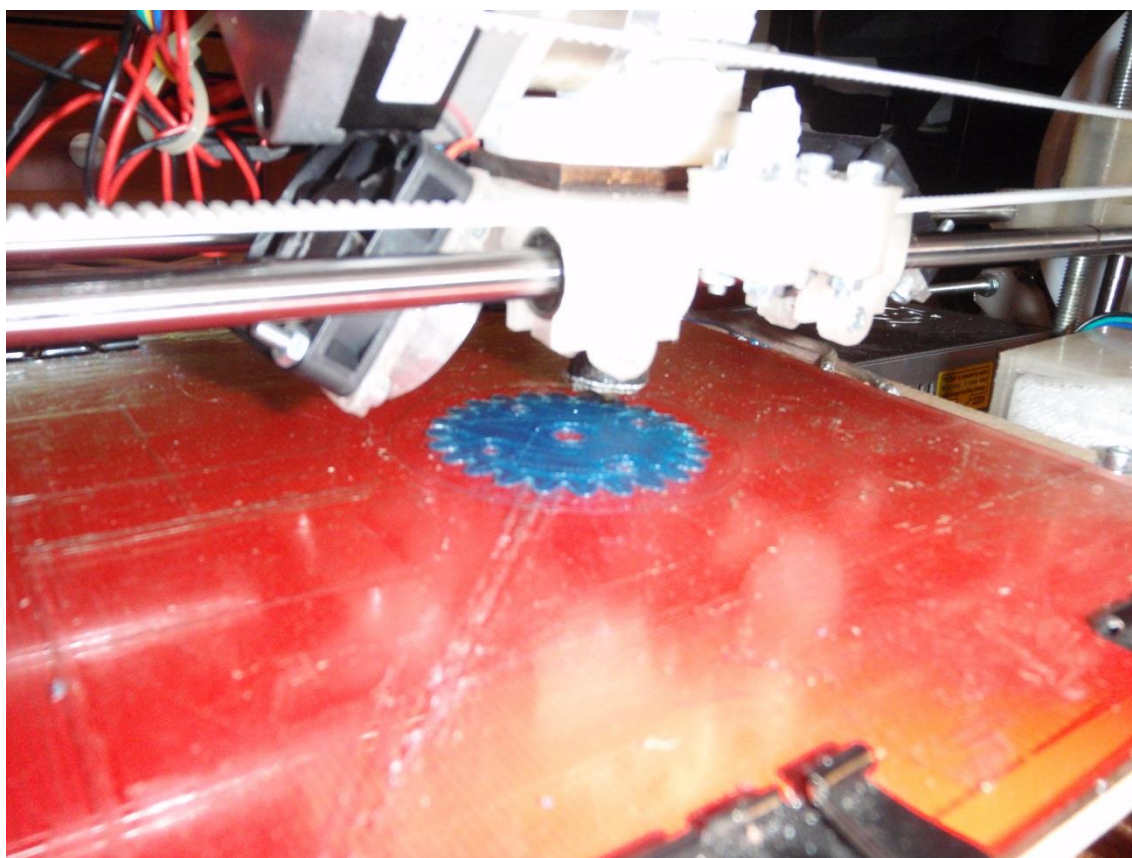


Obr. 16 Obrázek z programu Pronterface – dráha tiskové hlavy v první vrstvě





Obr. 17      Obrázek z programu Pronterface – dráha tiskové hlavy v 20  
vrstvě



Obr. 18      Fotografie tisku druhé vrstvy

### 3 Závěr a doporučení

#### 3.1 Parametry postavené tiskárny

V tabulce jsou uvedené vypočítané parametry. Přesnost vytištěných objektů záleží na nastavené výšce vrstvy a rychlosti tisku.

Tab. 3 Parametry

Rozlišení v osách ,x', ,y':	1/160 mm
Rozlišení v ose ,z':	1/2560 mm
Průměr trysky:	0,35 mm
Rozlišení extruderu:	0,005 mm <sup>3</sup>
Nejmenší výška vrstvy:	0,05 mm
Průměrná spotřeba:	120 W

Rozlišení v osách ,x' a ,y' bylo oproti jiným tiskárnám vylepšeno díky použití přesnějších krokových motorů, které mají úhel pootočení 0,9° na jeden celý krok. Na jejich hřídele byla připevněna hliníková ozubená kolečka, přes která je natažen řemen s roztečí zubů 2,5 mm. Použití valivých ložisek LM8UU a kalených broušených tyčí pro pojezdy byl další zásadní krok pro dosažení lepších výsledků.

#### 3.2 Porovnání s profesionální tiskárnou ZPrinter 450

Tiskárna, která je na Technické univerzitě v Liberci budova F, je ZPrinter 450 (<http://printin3d.com/3d-printers/zprinter-450>). Tato tiskárna funguje na principu nanášení vrstev prášku a jejich lepení. Tloušťka vrstvy je 0,089 – 0,102 mm, což je v porovnání s postavenou tiskárnou horší. Postavená tiskárna je aktuálně schopná tisknout s vrstvou 50 mikrometrů a je zde prostor k dalšímu zlepšení. Lepší parametry má však v šířce jedné stěny, kdy nejmenší stěna může být 0,15 mm široká. U postavené tiskárny je toto limitováno použitou tryskou, která má průměr 0,35 mm.

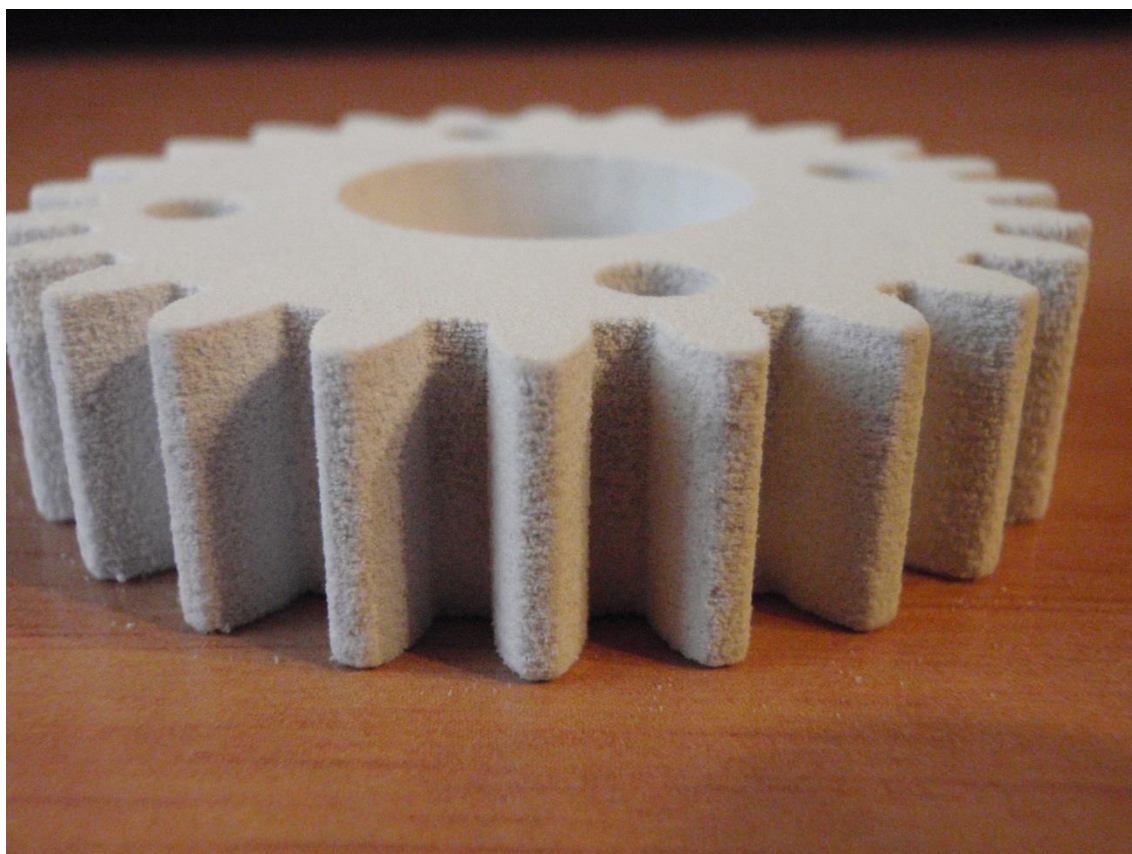
Výtisky z práškové tiskárny mohou sloužit pouze na okrasu. Jejich funkční použití nepřipadá v úvahu, protože jejich pevnost je velmi malá. Nehtem lze bez problémů rýt do povrchu kolečka. Nicméně použití tiskárny pro tisk modelů budov a jiných uměleckých předmětů je ideální. Rozlišení této tiskárny závisí hlavně na kvalitě

použitého prášku a míře recyklace. Vrstvy jsou okem viditelné a v menších otvorech jsou nepřesnosti. Je to pravděpodobně způsobeno chybným výpočtem nanášení drah lepidla. Prášek se v dírách lepí i do stran.

Výrobky z postavené tiskárny jsou mnohem pevnější a přesnější. Díra určená pro ložisko má přesnější rozměry. Vrstvy jsou viditelné kvůli nestejně rozložené teplotě trysky. Rozdílná teplota může ovlivnit barvu tištěného plastu. Po dokonalém seřízení tiskárny by vrstvy neměly být vidět.

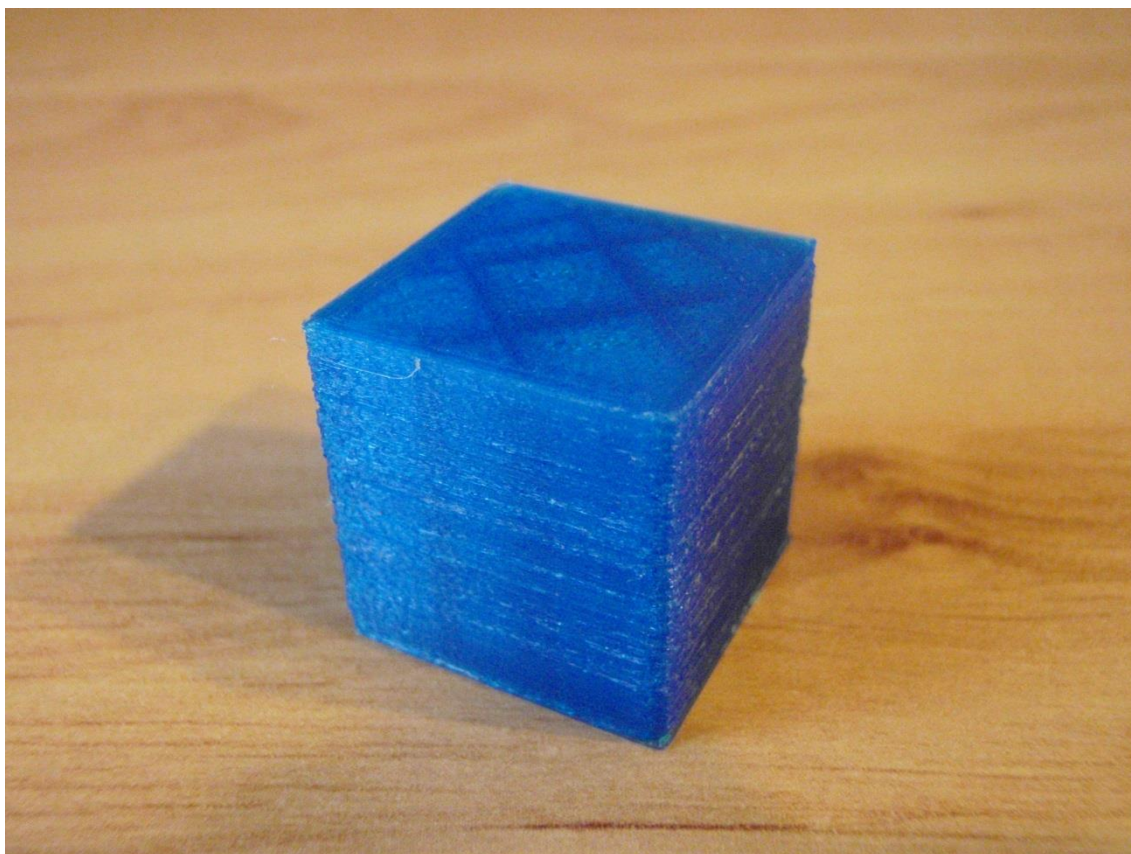
Rychlost tisku obou tiskáren je přibližně stejná. Každá tiskárna se hodí pro něco jiného. Srovnání s touto tiskárnou bylo zvoleno kvůli dostupnosti i ceně. Výtisk porovnávaných objektů stál 200 Kč. Na profesionální tiskárně, která funguje na podobném principu jako postavená, by výtisk stál kolem 1200 Kč. Tisk na postavené tiskárně vyšel přibližně na 25 Kč.

Fotografie výrobků jsou na přiloženém DVD, nebo na následujících obrázcích (Obr. 19, Obr. 20, Obr. 21).

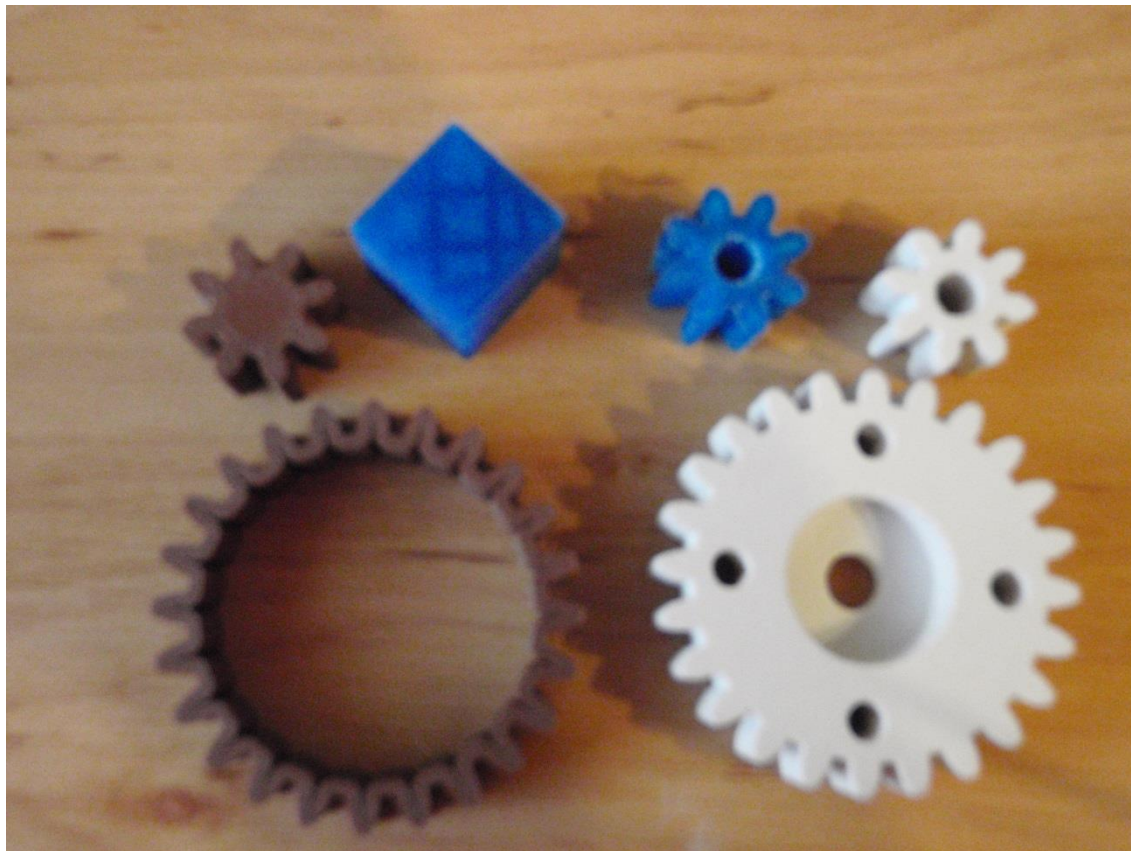


Obr. 19 Ozubené kolečko vytištěné na práškové tiskárně





Obr. 20 Krychle vytištěná na postavené tiskárně



Obr. 21 Barevné výtisky na postavené tiskárně, bílé na práškové

### 3.3 Doporučení pro stavbu další tiskárny

I přes výborné výsledky postavené tiskárny je zde možnost dalšího vylepšení. Pokud máme dostatek financí, je možné vytvořit konstrukci z hliníkových profilů, kde se kolmosti jednotlivých os dosahuje mnohem jednodušeji. V rámci projektu RepRap jsou již vytvořeny modely jednotlivých spojovacích součástí, které lze vytisknout nebo nechat vypálit laserem. Další možností je použití profesionálně vyrobených lineárních pojezdů nebo pro jejich vytvoření použít kvalitnějších součástek a pro jejich pohyb použít kuličkové šrouby místo ozubených řemenů nebo obyčejných závitových tyčí.

Lze vylepšit i elektroniku. Můžeme použít lepší ovladače krokových motorů, které zvládnou větší mikrokrokování a dodají do motoru vyšší proud. Nebyl by problém použít i profesionální elektroniku pro CNC stroje Mach3. Generátor G-kódu má možnost vygenerovat příkazy i pro tento kontrolér.

### 3.4 Možnosti vylepšení postavené tiskárny

Na postavené tiskárně bylo aplikováno mnoho různých vylepšení, která doporučovali ostatní uživatelé a která byla zřejmá po stavbě první 3D tiskárny. Nicméně je zde možnost rozšířit elektroniku tiskárny o WiFi modul, který má sériové rozhraní, aby bylo možné tiskárnu ovládat nebo kontrolovat pomocí internetu. Mnohem všestrannější by bylo připojení Raspberry Pi (malý modul počítače), ke kterému lze připojit kameru, a přes vzdálenou plochu tiskárnu sledovat. Raspberry Pi bude v budoucnu použito na ovládání a spravování elektronických výtvorů, nejenom 3D tiskárny.

Konstrukčním vylepšením by mohl být automatický stůl, který by po dokončení tisku objekt shodil do připraveného kontejneru a spustil by se další tisk bez nutnosti obsluhy. Vzhledem k zamýšleným účelům a použití je toto zbytečné.

Nastavení parametrů může být ještě optimalizováno. Jedná se o odlaďování jednotlivých parametrů tisku. Například nastavení rychlosti, zrychlení, pořadí tištěných drah (obvod objektu, výplň, podpůrné sloupky), teploty základní vrstvy a mnoha dalších. Jedinou překážkou k „dokonalému“ nastavení je čas. Pokud upravíme jeden parametr, musíme vygenerovat G-kódy, předat je tiskárně a nechat ji tisknout. Tisk základních testovacích modelů je v řádu hodin. Po dokončení je potřeba objekt analyzovat a podle toho upravit další parametry. Na internetu je velké množství testovacích objektů, u kterých je popsána jejich analýza a parametry, které jsou pro ten

daný objekt důležité. Přesto základní nastavení tiskárny pro dosažení větší přesnosti než 0,2 mm může trvat týdny. Tiskárna by měla být schopná tisknout s výškou vrstvy i 0,01 mm, ale nastavení parametrů a hlavně následný tisk jsou časově náročné. Objekt 50 mm vysoký by byl složen z 5 000 vrstev.

V případě potřeby může být namontována tryska s menším průměrem. Připravená tryska má průměr 0,25 mm, aktuálně použitá má průměr 0,35 mm. Experimentuje se i s menšími průměry, ale dochází k častějšímu ucpávání trysky. Správné nastavení všech parametrů je zde velmi kritické. Při nesprávné teplotě může dojít ke zvýšení tlaku v trysce a tím ke změně vlastností plastu. Ten pak musí být odstraněn chemicky, nebo při vyšší teplotě fyzicky.

V budoucnu bude pravděpodobně rozšířena o další extrudér, který bude tisknout jiný druh plastu. Tiskárna je k tomuto rozšíření připravena. Elektroniku lze rozšířit připojením dalšího ovladače krokového motoru i připojením dalšího čidla teploty. Zdroj má 15A rezervu, která bezproblémově pokryje vyšší spotřebu. Rozměry tiskárny umožňují připojení dalšího extrudéru (krokového motoru i trysky) bez zásadní změny konstrukce tiskárny. Změnou orientace aktuálního držáku plastu lze přidat další, pro druhý extrudér.

### **3.5 Závěr**

Sestavená tiskárna splnila očekávání a její přesnost je pro požadované účely více než dostačující. Vzhledem k rychlosti tisku a jednoduchosti práce s 3D modely je tiskárna vhodná pro rychlou výrobu prototypů i finálních výrobků. Díky velkému rozšíření jsou možnosti 3D tiskáren každým dnem zdokonalovány a stále přibývá mnoho 3D modelů, které mohou být staženy a vytištěny. O postavenou tiskárnu se zajímá i ústav NTI na TUL, kde by mohla být využita pro nanášení biologicky odbouratelných plastů.

Tiskárna je sestavená z běžně dostupných materiálů, které lze koupit v každém železářství. Některé součástky byly vytištěny na původní 3D tiskárně. Elektroniku nabízí velké množství internetových obchodů. Jedinou hůře sehnatelnou součástí je extrudér. Ten byl zakoupen na stránkách <http://www.makergear.com/>. Firma sídlí v USA a díky poštovnímu se tato součástka výrazně prodrazí. Investice je však nutná, pokud chceme dosáhnout vyšších přesností. Jinak lze extrudér vyrobit doma v dílně. Na internetu jsou návody i 3D modely jednotlivých součástí.

Při stavbě tiskárny nebylo zapotřebí zvláštních nástrojů. Pouze dříve postavená 3D tiskárna, ploché a imbusové klíče, šroubováky, kombinační kleště a vrtačka. K sestavení elektroniky stačí pájecí stanice. Díky tomu si může 3D tiskárnu postavit každý elektronik.

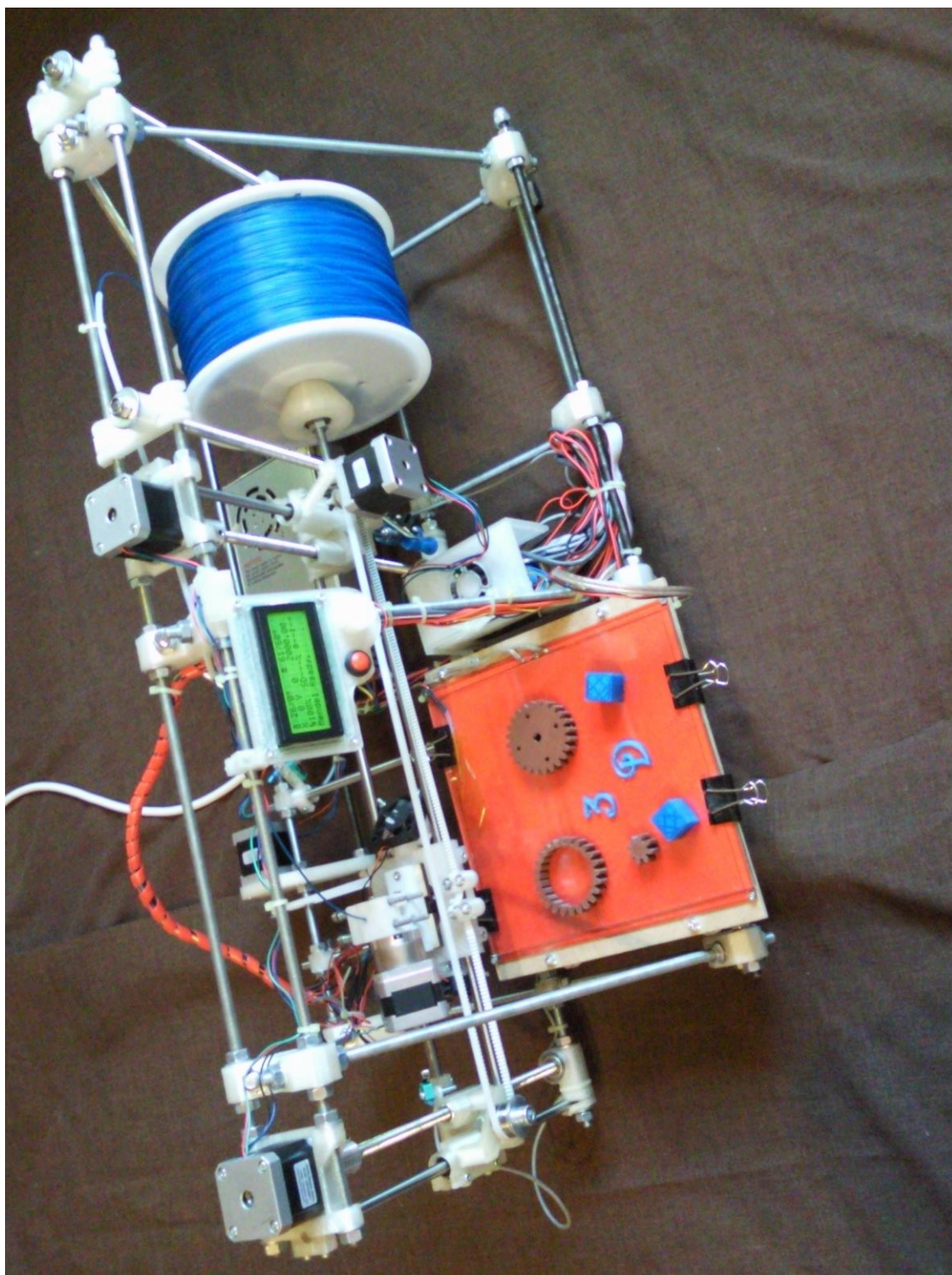
Pokud by se připravily všechny materiály a součásti, bylo by možné sestavit podobnou tiskárnu během jednoho dne. Tiskárna vzniklá v rámci této práce, byla vyvíjena mnoho týdnů. Některé součásti byly několikrát měněny za vhodnější. I elektronika byla vylepšována. Pokud by se měla 3D tiskárna stavět ve škole, bylo by potřeba vytvořit konstrukci z hliníkových profilů. Tím by se značně zjednodušilo seřízení tiskárny. Za úvahu by stálo použití hotových lineárních pojezdů.

Nejobtížnější na celé stavbě tiskárny je její seřízení. Nejdříve je nutné seřídít mechaniku 3D tiskárny tak, aby všechny osy byly na sebe kolmé a jednotlivé pojezdy jezdily hladce. K tomu je potřeba vodováha, olovnice a úhloměr. Seřízení tiskárny podobné konstrukce může trvat i několik dní. Poté je nutné odladit elektroniku tiskárny. Od vypočítaných parametrů, jako je počet kroků motoru na jednotku délky až po maximální zrychlení, které se musí zjistit experimentálně. Nakonec je potřeba nastavit program pro generování G-kódu tak, aby tištěné objekty byly co nejpřesnější. To může trvat i několik týdnů.

Konstrukce tiskárny postavené v rámci této bakalářské práce přišla přibližně na 12 tisíc korun. Nejdražší součástí je extrudér, který stál pět tisíc korun. Plast do tiskárny stojí cca 1 Kč/g. Vzhledem k nízké hustotě a možnosti tiskárny dělat objekty částečně duté, je tisk velmi levný.

Na přiloženém DVD se nachází fotodokumentace postavené 3D tiskárny i videa probíhajícího tisku.





Obr. 22      Fotografie finální konstrukce 3D tiskárny s vytištěnými objekty



## Seznam použité literatury

- [1] US military is developing its own 3D printers for the frontline. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.dezeen.com/2012/11/12/us-military-invests-in-3d-printing-on-the-frontline/>
- [2] HOME OF THE WIKI WEAPON PROJECT. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://defdist.org/>
- [3] The 3D printed future of medicine is here today. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: [http://www.textually.org/3DPrinting/cat\\_printing\\_prosthetics.html](http://www.textually.org/3DPrinting/cat_printing_prosthetics.html)
- [4] The first 3D-printed human stem cells. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.designboom.com/technology/3d-printed-organs-from-regenerative-living-cells/>
- [5] 3D scanning. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/3d-scanning.html>
- [6] RepRap history. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/RepRap\\_history](http://reprap.org/wiki/RepRap_history)
- [7] Josef Prusa. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://josefprusa.cz/>
- [8] Arduino Mega 2560. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- [9] Ramps 1.4. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4)
- [10] Slic3r. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://slic3r.org/>
- [11] Printron. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Printrun>
- [12] Zprinter 450. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://printin3d.com/3d-printers/zprinter-450>